



005001499

На правах рукописи

НЕСТЕРОВА Наталья Сергеевна

**ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
У-РЬ ВОЗРАСТОВ СФЕНОВ ИЗ АРХЕЙСКИХ ПОРОД
КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА И БЕЛОМОРСКОГО
ПОДВИЖНОГО ПОЯСА ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА**

Специальность 25.00.01 – общая и региональная геология

АВТОРЕФЕРАТ

1 0 НОЯ 2011

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва
2011

Работа выполнена в Институте геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
Слабунов Александр Иванович

Официальные оппоненты:
доктор геолого-минералогических наук, профессор
Божко Николай Андреевич
доктор геолого-минералогических наук
Щипанский Андрей Анатольевич

Ведущая организация:
Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)

Защита состоится **25 ноября 2011 г. в 14 часов 30 мин.** на заседании диссертационного совета Д. 501.001.39 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, аудитория 415.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (главное здание, корпус А, 6 этаж).

Автореферат разослан 24 октября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.39
доктор геол.-мин. наук, профессор



А.Г. Рябухин

Введение

Актуальность темы

Привлечение U-Pb, Ar-Ar, Sm-Nd и других методов изотопной геохронологии для решения геологических задач сыграло огромную роль в выделении главных стадий развития земной коры. Каждый из этих методов имеет свои граничные условия по многим параметрам. Благодаря высокой температуре закрытия изотопной системы циркона и устойчивости к внешним воздействиям, по результатам его U-Pb изотопного датирования можно определять возраст магматических и метаморфических процессов, что послужило в свое время революционным толчком для палеогеодинамических построений, особенно в докембрии. Использование новых минералов-геохронометров при изучении докембрийских, в частности полиметаморфических, комплексов позволяет существенно улучшать понимание процессов эволюции Земли на ранних стадиях ее существования, повысить качество геологических моделей, в том числе тектонических карт, что, однако, требует понимания связи возраста датированного минерала и геологических процессов, в ходе которых он формировался. Одним из важных и перспективных минералов-геохронометров является сфен (титанит). По результатам экспериментов температура закрытия его изотопной U-Pb системы составляет около 600–700 °C, что меньше температуры закрытия изотопной системы циркона.

Возможность использования изотопного U-Pb возраста сфена в качестве индикатора границы между крупными докембрийскими структурами с принципиально разным стилем реализации поздних тектонических процессов была показана на примере Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита (Бибикова и др., 1999; Bibikova et al., 2001). В представленной работе, которая является логическим продолжением этих исследований, показано, что возраст сфена может быть полезен не только для оценки положения границ между тектоническими структурами разного порядка, но и для интерпретации природы этих границ. Синтез геохронологических и геологических данных позволяет тестировать и совершенствовать геодинамические модели формирования земной коры региона.

Цели и задачи исследования

Основной целью исследования являлось обоснование возможности применения U-Pb возрастов сфенов при тектоническом районировании территории и тестировании геодинамических моделей на примере Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- геохронологическое изучение сфенов из архейских пород различных террейнов Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита;

- создание базы данных U-Pb возрастов сфенов восточной части Фенноскандинавского щита;
- анализ пространственного расположения возрастов сфенов и сопоставление этих данных с существующими схемами тектонического районирования региона;
- сопоставление возрастов сфенов и цирконов из архейских пород Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса;
- тестирование существующих геодинамических моделей на основе анализа вариаций возрастов сфенов из пород Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита.

Фактический материал

Каменный материал собран автором в ходе полевых работ лаборатории петрологии и тектоники ИГ КарНЦ РАН в период 2003–2010 гг., а также предоставлен коллегами по его просьбе. В процессе работы над диссертацией получено 25 новых U-Pb датировок сфена, изотопный состав измерен на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре ТРИТОН (ГЕОХИ РАН, Москва). Составлена база данных U-Pb возрастов сфенов восточной части Фенноскандинавского щита (более 100 датировок). Изучены химические составы сфенов (168) и включений в них (81) на микрозонде TESCAN (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск).

Научная новизна

Впервые проведена систематизация U-Pb возрастов сфенов из архейских пород главных структур восточной части Фенноскандинавского щита. Получены новые данные об изотопном U-Pb возрасте сфенов Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса (всего 25 определений). Показана возможность использования U-Pb возраста этого минерала в качестве индикатора границы не только между Беломорским подвижным поясом и Карельским кратоном, но и между террейнами в пределах последнего. Продемонстрирована возможность применения U-Pb геохронологии сфена в качестве дополнительного критерия при тектоническом районировании докембрийских областей и тестирования существующих геодинамических моделей их развития.

Защищаемые положения

1. В пределах восточной части Фенноскандинавского щита наблюдаются закономерные вариации U-Pb возраста сфенов: в Карельском кратоне сфены преимущественно имеют архейский возраст (2.50–2.87 млрд. лет), а в пределах Беломорского подвижного пояса – палеопротерозойский (1.74–1.94 млрд. лет), при наличии редких исключений. Резкое изменение изотопного U-Pb возраста сфена является одним из проявлений границы между неоархейским Карельским кратоном и Беломорским подвижным поясом.

2. Изотопный U-Pb возраст сфена может быть использован для тектонического районирования Карельского кратона, так как наиболее древние сфены (древнее 2.8 млрд. лет) установлены только в пределах Водлозерского террейна, в то время как сфены из пород других террейнов кратона имеют возраст 2.50–2.75 млрд. лет.

3. В Карельском кратоне возраст сфена фиксирует преимущественно стадии кратонизации земной коры (2.6–2.7 и 2.8 млрд. лет), а в пределах Беломорского подвижного пояса отражает время (1.8–1.9 млрд. лет) вывода тектонических пластин со среднекоровых глубин в приповерхностную область в ходе коллизионной стадии развития Лапландско-Кольского орогена.

Практическая значимость работы

Данные об изотопном U-Pb возрасте сфенов являются дополнительным критерием при тектоническом районировании и составлении тектонических карт, что в свою очередь может быть использовано для обоснования металлогенических провинций.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на 57-й, 58-й и 59-й научных студенческих конференциях (Петрозаводск, 2005, 2006, 2007), III и IV российских конференциях по изотопной геохронологии (Москва, 2006, Санкт-Петербург, 2009), XIV научной студенческой школе «Металлогения древних и современных океанов – 2008. Рудоносные комплексы и рудные фации» (Миасс, 2008), XIX и XX конференциях молодых ученых, посвященных памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца (Апатиты, 2008, Петрозаводск, 2009), I и II международных научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов, посвященных памяти академика А. П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2009, 2011), международной конференции, посвященной памяти В. Е. Хаина «Современное состояние наук о Земле» (Москва, 2011), 63-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, 2011), Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, 2011), научном семинаре ИГ КарНЦ РАН (Петрозаводск, 2011).

По теме диссертации опубликовано или находится в печати 16 работ, из них 1 статья в сборнике и 3 – в рецензируемых журналах.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка работ опубликованных по теме диссертации и списка литературы. Объем работы – 135 страниц, 25 рисунков, 3 таблицы. Список литературы содержит 150 наименований.

Во введении определена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе дан обзор геологического строения Фенноскандинавского щита, более подробно рассмотрены Карельский кратон и Беломорский подвижный пояс, а также некоторые опорные участки.

Во второй главе приводятся сведения о сфене: свойства, кристаллография, изоморфизм, температура закрытия его изотопной U-Pb системы, возможная геодинамическая интерпретация возрастов данного минерала. Изложены методики по подготовке сфена к датированию и по определению возраста. Представлены новые данные об изотопном возрасте 25 проб сфенов из пород Беломорского подвижного пояса и Карельского кратона.

Третья глава посвящена анализу имеющихся материалов. Приведена база данных U-Pb датировок сфенов восточной части Фенноскандинавского щита, составленная на основе личных и литературных данных. Показана возможность применения U-Pb геохронологии сфена для тектонического районирования и тестирования геодинамических моделей формирования восточной части Фенноскандинавского щита.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю доктору геолого-минералогических наук, профессору А. И. Слабунову (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск) за поддержку, критические замечания и постоянную помощь на всех этапах работы. Особую признательность автор выражает доктору геолого-минералогических наук Е. В. Бибиковой (ГЕОХИ РАН, Москва) за консультации по геохронологии и обсуждение проблемы, без участия которой настоящее исследование было бы невозможно. Автор признателен кандидату химических наук М. М. Фугзан и Т. И. Кириной (ГЕОХИ РАН, Москва), под руководством и при участии которых были получены геохронологические результаты данной работы. Автор благодарна доктору геолого-минералогических наук О. И. Володичеву, кандидатам геолого-минералогических наук А. В. Степановой, Н. Е. Король, О. С. Сибелеву и всему коллективу лаборатории петрологии и тектоники ИГ КарНЦ РАН, а также докторам геолого-минералогических наук профессору В. В. Щипцову и С. А. Светову за ценные советы и внимание к работе. Автор благодарит докторов геолого-минералогических наук А. И. Слабунова, О. И. Володичева, В. В. Щипцова, кандидатов геолого-минералогических наук О. С. Сибелева, Л. В. Кулешевич, В. А. Костина (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск), доктора геолого-минералогических наук А. В. Самсонова (ИГЕМ РАН, Москва), кандидата геолого-минералогических наук Н. В. Гусеву (ИГГД РАН, Санкт-Петербург) за любезно предоставленные образцы сфенов, что позволило автору расширить коллекцию для проведения исследований.

Глава 1. Геологический обзор восточной части Фенноскандинавского щита

По возрасту и особенностям становления континентальной коры Фенноскандинавский щит подразделяется на следующие провинции: Карельскую, Мурманскую, Норрботтен, Кольскую, Беломорскую, Свекофеннскую и Свеконорвежскую. Первые три по особенностям строения и эволюции относятся к неоархейским кратонам (Козлов и др., 2006; Слабунов и др., 2006 б; Lahtinen et al., 2005 и др.), Кольская является тектоническим коллажем пластин (террейнов), сложенным главным образом архейскими породами и завершившим свое развитие в палеопротерозое в связи с развитием Лапландско-Кольского орогена (Балаганский и др., 2006), Беломорская – докембрийским подвижным поясом (Слабунов, 2008), Свекофеннская и Свеконорвежская – палеопротерозойскими орогенами (Gaál, Gorbatshev, 1987).

Карельский кратон составляет своеобразное древнее ядро Фенноскандинавского щита. Он представляет собой классический пример гранит-зеленокаменной области, сложенной гранитоидами и гранито-гнейсами, среди которых залегают зеленокаменные, парагнейсовые и гранулит-энтербит-чарнокитовые комплексы (Ранний..., 2005). В составе Карельского кратона выделяются террейны (рис. 1): Водлозерский, Центральнo-Карельский, Иломантси-Вокнаволоцкий, Кианта, Иисалми, Рануа, Тунтса (Восточно-Лапландский) и Помокайра, каждый из которых характеризуется особенностями эволюции земной коры (Слабунов и др., 2006 б; Sorjonen-Ward, Luukkonen, 2005).

Фрагменты наиболее древних пород Карельского кратона – ТТГ и амфиболиты возрастом 3.1–3.4 (до 3.7) млрд. лет – фиксируются в террейнах Иисалми, Рануа и Водлозерском. В Водлозерском отмечаются наиболее древние зеленокаменные комплексы возрастом 2.95–3.1 млрд. лет (Светов, 2009), а также более молодые – 2.85–2.9 млрд. лет (Кожевников и др., 2006; Лобач-Жученко и др., 1999; Puchtel et al., 1999). Помимо этого, в пределах террейна развиты разновозрастные ТТГ породы (2.88, 2.9–2.98 млрд. лет) и граниты (2.68–2.71, 2.87 млрд. лет), а также, ряд небольших интрузий санукитоидов (~ 2.74 млрд. лет) (Ранний..., 2005). В рамках настоящего исследования был определен возраст сфенов из пород Панозерского и Чалкинского санукитоидных массивов, из неоархейских гранитоидов Онежского комплекса гранитов (Костин, 1989), из пород мезоархейского ТТГ комплекса, а также из включения амфиболитов в тоналитах возрастом 3166 ± 14 млн. лет, район Лай-ручей (Lobach-Zhuchenko et al., 1993).

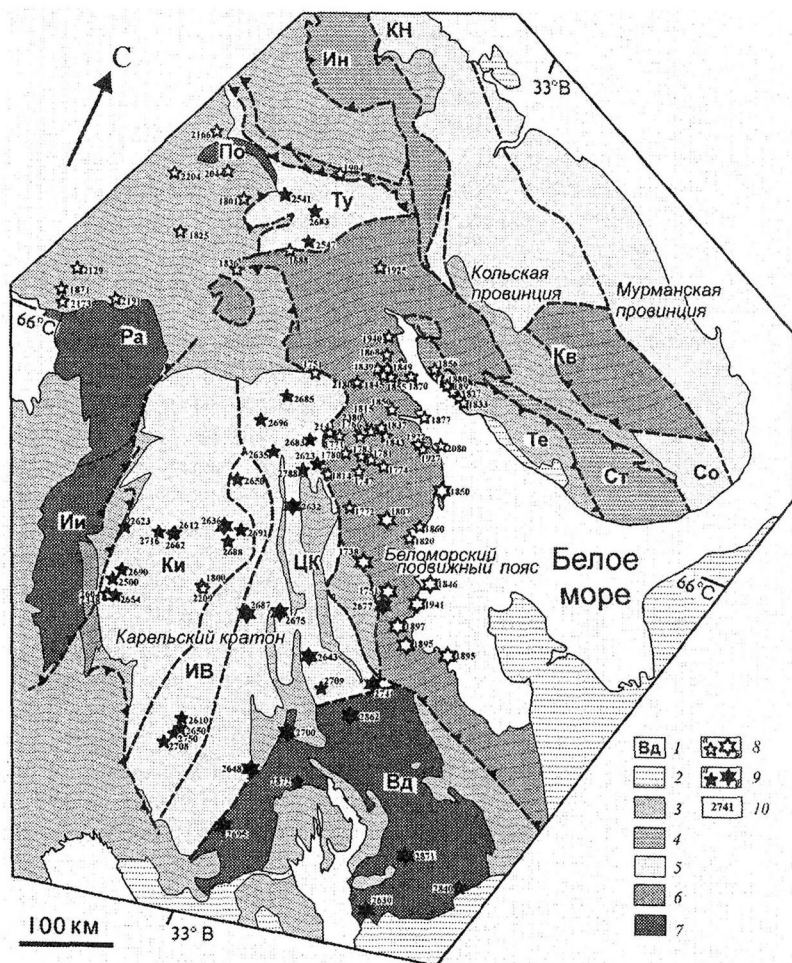


Рис. 1. Расположение датировок сфенов на схеме тектонического районирования восточной части Фенноскандинавского щита (Слабунов, 2008 с дополнениями)

1 – обозначения террейнов: Вд – Водлозерский, ИВ – Иломантси-Вокнаволоцкий, Ии – Ии-самми, Ки – Киаанта, По – Помоайра, Ра – Рануа, Ту – Тунтса, ЦК – Центрально-Карельский; 2 – палеозойские и неопротерозойские комплексы каледонид и платформ; 3 – палеопротерозойские комплексы; 4 – тектоническая смесь неархейских и палеопротерозойских комплексов; 5–7 – архейские образования (гранитоиды, зеленокаменные и парагенетические комплексы), возраст, млрд. лет: 5 – 2.7–3.1, 6 – 2.7–2.9 (переработанные в палеопротерозое), 7 – 2.7–3.4 (3.7); 8–10 – месторождение сфенов, возраст, млрд. лет: 8 – 1.74–2.45: а – литературные данные, б – личные данные, 9 – 2.50–2.87: а – литературные данные, б – личные данные, 10 – U-Pb возраст сфена

Террейны Тунтса, Кианта и Иломантси-Вокнаволоцкий характеризуются более молодым возрастом слагающих их комплексов (не древнее 3.1 млрд. лет). Здесь развиты главным образом зеленокаменные комплексы возрастами 2.8–2.9, 2.73–2.8, 2.5–2.72 млрд. лет (Бибикова и др., 2005; Кожевников, 2006; Лобач-Жученко и др., 2000 а; Juopperi, Vaasjoki, 2001; Puchtel et al., 1997; Sorjonen-Ward, Luukkonen, 2005). Породы зеленокаменных поясов прорываются различными гранитоидами. Кроме того, в террейне Кианта выделяют Парагнейсовый пояс Нурмес возрастом 2.68–2.72 млрд. лет (Kontinen et al., 2007; Sorjonen-Ward, Luukkonen, 2005). А в террейне Иломантси-Вокнаволоок – неоархейские (2.72 млрд. лет) гранулитовые комплексы (Володичев и др., 2003). В процессе изучения определялся возраст сфенов из натриевых гранитов, прорывающих Костомукшский зеленокаменный пояс (террейн Кианта).

Особенностью Центрально-Карельского террейна является относительно молодой возраст слагающих его ТТГ и зеленокаменных комплексов – 2.7–2.8 млрд. лет (Самсонов и др., 2001) и широкое распространение интрузий неоархейских санукитоидов (Бибикова и др., 1997; Ларионова и др., 2007; Halla, 2005). В данном террейне определен возраст сфенов из Нюкозерского санукитоидного массива, метавулканитов Хедозеро-Большезерского зеленокаменного пояса и ряда проб из пород ТТГ комплекса.

Беломорский подвижный пояс сложен главным образом архейскими (2.9–2.60 млрд. лет) глубокометаморфизованными гранитоидными, зеленокаменными и парагнейсовыми комплексами (Слабунов, 2008). Обычны здесь и протерозойские образования, представленные гранитоидами, пегматитами и габброидами – друзитами (Слабунов и др., 2006 а).

Существенную роль в структуре Беломорского подвижного пояса играют архейские и палеопротерозойские тектонические покровы (Миллер, Милькевич, 1995).

В рамках исследования было проведено датирование нескольких проб сфенов из неоархейских ТТГ пород, из метаматрикса архейского меланжа в пределах Керетского зеленокаменного пояса, архейских эклогитов, а также двух проб из палеопротерозойских интрузивных чарнокитоидов.

Карельский кратон и Беломорский подвижный пояс контрастно отличаются друг от друга по особенностям проявления метаморфических процессов. Породы кратона были метаморфизованы в архее в условиях (Геология Карелии, 1987; Ранний докембрий..., 2005), как правило, зеленосланцевой и амфиболитовой фаций (местами до гранулитовой) преимущественно низких давлений. Метаморфизм палеопротерозойского (свекофеннского) возраста в его пределах проявлен локально. Тогда как в Беломорском подвижном поясе установлены (Володичев, 1990; Сибелев,

1998; Слабунов и др., 2006 а) неоднократные проявления метаморфизма как архейского, так и палеопротерозойского возраста амфиболитовой и гранулитовой фаций умеренных и высоких давлений, а также эклогитовой фации.

Глава 2. Сфен и его U-Pb система

Сфен (титанит) $\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O}, \text{OH}, \text{F})$, благодаря изоморфному вхождению урана в его кристаллическую решетку, является одним из минералов-геохронометров. U-Pb возраст сфена отражает время, когда минерал остыл до температуры закрытия его изотопной системы – температуры, при которой скорость потерь изотопов Pb за счет диффузии становится незначительной по сравнению со скоростью его накопления.

На основании экспериментальных данных температура закрытия изотопной U-Pb системы сфена ($T_{\text{закр. сфена}}$) оценивается в 650–700 °C (Cherniak, 1993; Frost et al, 2000), что частично согласуется с теоретическими расчетами (Dahl, 1997), а также подтверждается эмпирически (Essex et al., 1997; Gao et al., 2011; Pidgeon et al., 1996; Rigby, Armstrong, 2011; Scharer et al., 1994; Scott, St-Onge, 1995; Verts et al., 1996; Zhang, Scharer, 1996). Вместе с тем в ряде других работ, основанных на петрологических наблюдениях, отмечается, что температура закрытия изотопной U-Pb системы сфенов, вероятно, должна быть несколько ниже ~ 500–600 °C, это объясняется несоответствием температуры закрытия минерала и условиями метаморфизма (Castelli, Rubatto, 2002; Hanson et al., 1971; Mezger et al., 1993; Tucker et al., 1987 и др.). Кроме того, следует обратить внимание на то, что в пределах Беломорского подвижного пояса температура палеопротерозойского метаморфизма, как правило, не превышала 500–570 °C (в отдельных случаях 800–850 °C) (Володичев, 1990; Володичев и др., 2011), при этом перестройка изотопной системы сфенов происходила. Это означает, что вопрос о температуре закрытия изотопной системы сфена требует дополнительного изучения. Важно отметить, что температура закрытия изотопной системы сфена ниже, чем у циркона, и выше, чем у рутила.

Данные об U-Pb возрастах сфенов в сочетании со знаниями о геологии региона и информацией об изотопном возрасте других минералов (циркон, рутил, монацит) позволяют тестировать геодинамические модели, привязывать возрасты изотопных систем сфенов к конкретным тектоно-термальным событиям.

Изотопный возраст сфена может отражать возраст как магматических, так и метаморфических процессов, кроме того, при повышении температуры изотопная система уже существующего сфена может переуравновеситься. Подобные процессы могут иметь региональный и локальный характер.

В региональном масштабе переуравновешивание изотопной системы сфена может быть вызвано, например, прогревом коры в результате воздействия плюма (рис. 2 а). Если $T > T_{\text{закр. сфена}}$, то изотопная система уже существующих сфенов нарушается и их возраст «обнуляется». После отмирания плюма кора остывает и изотопная система сфена закрывается. Сфен в таком случае отражает время «ухода» изотермы $T = 650$ (550) °С. К данной модели следует обращаться, когда установлены комплексы-индикаторы плюма.

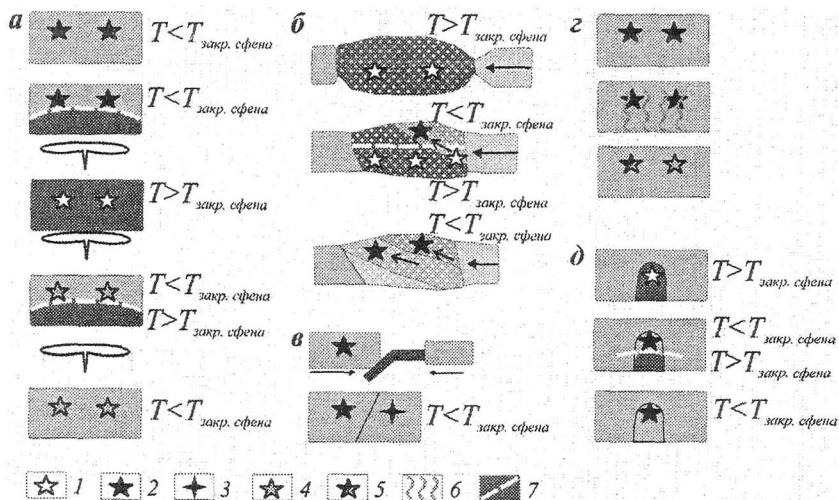


Рис. 2. Геодинамическая интерпретация изотопного U-Pb возраста сфена (подробное описание смотри в тексте)

1 – сфены с открытой изотопной системой; 2 – сфены с закрытой изотопной системой; 3 – новообразованные сфены; 4 – сфены с полностью нарушенной изотопной системой; 5 – сфены с частично нарушенной изотопной системой; 6 – флюид; 7 – изотерма, соответствующая температуре закрытия изотопной системы сфена ($T_{\text{закр. сфена}}$)

Сфен также может фиксировать время остывания блока коры после тектонического выведения со среднекоровых глубин, где $T > T_{\text{закр. сфена}}$ и соответственно изотопная система сфена открыта, в приповерхностную область с более низкой температурой ($T < T_{\text{закр. сфена}}$) (рис. 2 б). Геологическим обоснованием данной модели является наличие крупных надвигов и комплексов, метаморфизованных в высокобарических и высокотемпературных условиях, а также отсутствие корреляции между возрастами сфена и циркона.

Следует отметить, что в обоих случаях возможна кристаллизация новообразованного сфена.

Кроме того, сфен может отражать время стабилизации (кратонизации) континентальной новообразованной земной коры, сформированной в ходе субдукционно-аккреционных процессов (рис. 2 в). В этом случае возраст сфенов близок ко времени завершающих стадий ее становления (в частности, к возрасту цирконов в гранитных интрузиях – индикаторах зрелой коры).

В перечисленных случаях сфены близкого возраста должны иметь широкое распространение.

При наличии зон или геологических тел, в которых сфен имеет близкий возраст, например разломов с метасоматической переработкой, изотопная система этого минерала может фиксировать время воздействия гидротермального флюида (рис. 2 г), в результате как формируются новые генерации сфенов, так и нарушаются (полностью или частично) U-Pb системы уже существующих. При частичном нарушении изотопной системы в ней сохраняются более древние реликты. В случае интрузивных тел возраст сфена показывает время остывания пород ниже $T_{\text{закр. сфена}}$ (рис. 2 д). При отсутствии наложенных процессов разница в возрасте сфена и циркона будет отражать скорость остывания интрузии. В приконтактной зоне во вмещающих породах изотопные системы уже существующих сфенов могут быть нарушены.

Глава 3. U-Pb возраст сфена и тектоническое районирование восточной части Фенноскандинавского щита: синтез данных

Возраст сфенов в пределах Карельского кратона варьирует преимущественно от 2.50 до 2.87 млрд. лет, а в Беломорском подвижном поясе, за редким исключением – от 1.74 до 1.94 млрд. лет (рис. 1, 3). Близкий возраст с последним показывают сфены из пород Кольской провинции (Кольвицкий пояс). Сфены северо-восточной части Свекофеннской провинции в основном палеопротерозойские (рис. 1).

Имеющиеся факты позволяют констатировать, что возраст сфена действительно является чутким индикатором границы между Карельским кратоном и Беломорским подвижным поясом. Также по этим данным четко фиксируется граница между кратоном и Свекофеннской провинцией, что объясняется разным временем формирования их коры (архей и палеопротерозой соответственно).

Особо следует отметить, что в Беломорском подвижном поясе пробы на сфен отбирались из пород различного состава и генезиса, причем как архейских, так и палеопротерозойских. Несмотря на это, возраст сфена достаточно стабилен и составляет, как правило, 1.74–1.94 млрд. лет, тогда

как возраст сфенов Карельского кратона чаще всего коррелируется с U-Pb возрастом цирконов из пород. При этом в Беломорском подвижном поясе установлены закономерные изменения возраста сфена. Отмечается, что в северо-восточной части пояса возраст сфена постепенно изменяется от 1.94 до 1.80 млрд. лет, между тем вблизи границы с Карельским кратоном маркируется зона со сфенами более молодого возраста – моложе 1.8 млрд. лет. При этом несколько проб сфенов, взятые в пределах этой зоны, оказались с более древними датировками – 2.14–2.67 млрд. лет (Бибикина и др., 1999; наст. исследование).

Кроме того, стоит обратить внимание на неоархейский возраст сфенов (2.54–2.68 млрд. лет) из пород террейна Тунтса, эти данные подтверждают предположение о том, что указанный террейн не относится к Беломорскому подвижному поясу (Слабунов, 2008; Hölttä et al., 2008), как считалось ранее (Слабунов и др., 2006 б; Juorperi, Veki, 1988). Следует также отметить более молодой возраст сфенов и существенную разницу в возрасте сфенов и цирконов в пределах рассматриваемого террейна по сравнению с другими. Обращает на себя внимание и то, что среди архейских датировок сфенов Карельского кратона (террейн Кианта) выделяются несколько палеопротерозойских (рис. 1). Данное явление крайне необычно для кратона. Одна из этих проб отобрана из гальки полимиктового конгломерата архейского возраста палеопротерозойской структуры (бассейна) Саари-Киекки, предполагается, что относительно молодой возраст сфенов связан с локальной зоной поздней переработки (Luukkonen, 1989). Другая – из тоналитов в западной части террейна Кианта вблизи границы со Свекофеннской провинцией (Vaasjoki, 1999), здесь вероятно частичное нарушение изотопной системы сфена в связи с развитием Свекофеннского орогена. Третья проба была взята из палеопротерозойской дайки и соответствует аналогичному возрасту (Luukkonen, 1989) исследуемого минерала.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что изотопный U-Pb возраст сфена может быть использован в качестве критерия для оценки границы между Карельским кратоном и Беломорским подвижным поясом, что позволяет сформулировать *первое защищаемое положение*:

В пределах восточной части Фенноскандинавского щита наблюдаются закономерные вариации U-Pb возраста сфенов: в Карельском кратоне сфены преимущественно имеют архейский возраст (2.50–2.87 млрд. лет), а в пределах Беломорского подвижного пояса – палеопротерозойский (1.74–1.94 млрд. лет), при наличии редких исключений. Резкое изменение изотопного U-Pb возраста сфена является одним из проявлений границы между неоархейским Карельским кратоном и Беломорским подвижным поясом.

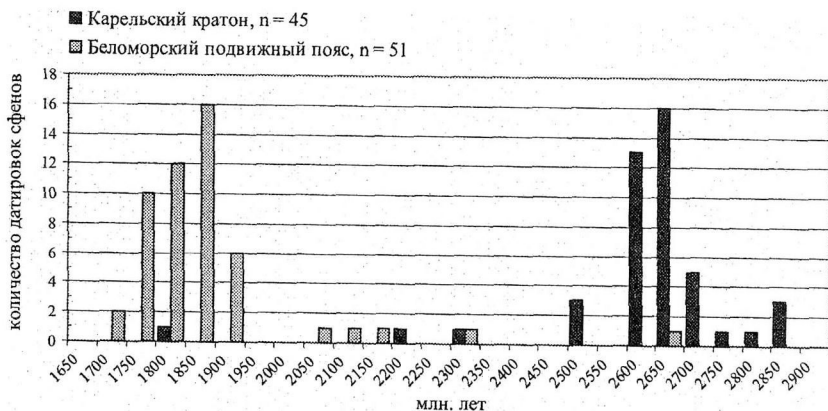


Рис. 3. Гистограмма распределения датировок сфенов из пород Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита. Гистограмма построена на основе личных и литературных данных

Как уже отмечалось, сфены в пределах Карельского кратона имеют главным образом архейский возраст, вместе с тем фиксируются закономерные его вариации. Четко выделяется восточный домен с более древними возрастными этого минерала (2.84–2.87 млрд. лет) и западный – с возрастными 2.60–2.75 млрд. лет (рис. 4).

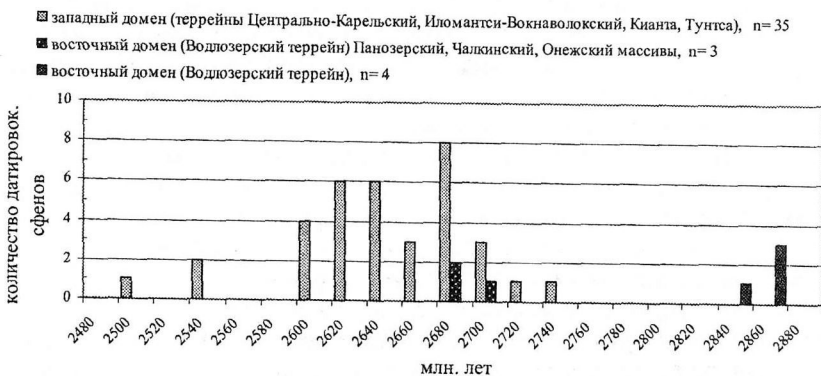


Рис. 4. Гистограмма распределения сфенов по возрастам из пород западного и восточного доменов Карельского кратона Фенноскандинавского щита. Гистограмма построена на основе личных и литературных данных

Сфены более древних (мезоархейских) возрастов концентрируются в пределах Водлозерского террейна. Вместе с тем здесь установлены и более молодые датировки этого минерала, полученные для неархейских Панозерского, Чалкинского и Онежского гранитоидных массивов (рис. 4). Исследования показали, что возрасты сфенов из массивов коррелируются с возрастом цирконов из них. Разница в возрасте сфенов и цирконов для массивов составляет около 50 млн. лет, что, вероятно, объясняется различием в температуре закрытия этих минералов и отражает скорость остывания массивов – около $7^{\circ}\text{C}/\text{млн. лет}$, это соизмеримо с оценками скорости для других объектов (Бибикова и др., 1999; Pidgeon et al., 1996 и др.), но существенно меньше вычисленной на основе теплофизических расчетов (Бурдюх, устное сообщ.).

Западный домен включает в себя террейны Центрально-Карельский, Иломанси-Вокнаволоцкий, Тунтса и Кианта. U-Pb возрасты сфенов из пород Центрально-Карельского террейна варьируют от 2.60 до 2.75 млрд. лет, Иломанси-Вокнаволоцкого – 2.61–2.75 млрд. лет, Тунтса – 2.54–2.68 млрд. лет, Кианта – 2.50–2.71 млрд. лет. Таким образом, сфены из западного домена Карельского кратона имеют близкий возраст (2.6–2.7 млрд. лет), поэтому оценка границы между ними с применением геохронологии сфена проблематична.

Более древние датировки сфена из пород Водлозерского террейна по сравнению со смежными с ним дают возможность использовать возрастные характеристики минерала в качестве индикатора границы между ними (рис. 1, 4). Таким образом, U-Pb возраст сфена может применяться для тектонического районирования Карельского кратона.

Второе защищаемое положение:

Изотопный U-Pb возраст сфена может быть использован для тектонического районирования Карельского кратона, так как наиболее древние сфены (древнее 2.8 млрд. лет) установлены только в пределах Водлозерского террейна, в то время как сфены из пород других террейнов кратона имеют возраст 2.50–2.75 млрд. лет.

На основе данных об U-Pb возрасте сфена можно протестировать ключевые стадии формирования главных структур Фенноскандинавского щита – Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса. За основу взята модель развития восточной части Фенноскандинавского щита (рис. 5), построенная по материалам В. В. Балаганского и др. (2006), С. А. Светова (2005); А. И. Слабунова (2008), Р. Лахтинена и др. (2005) и других исследователей.

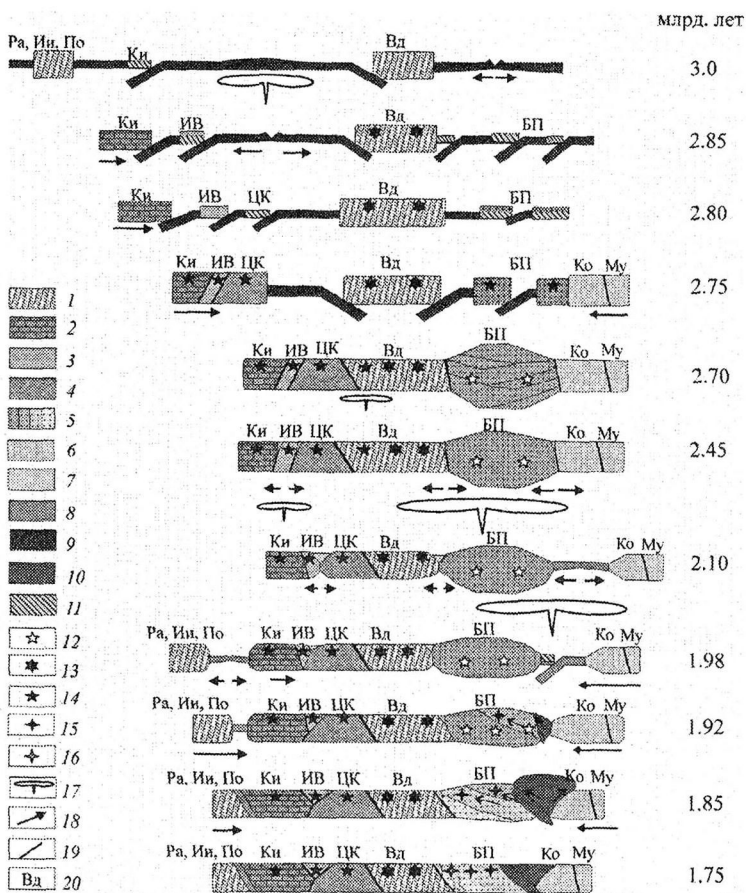


Рис. 5. Геодинамическая модель развития земной коры восточной части Фенно-скандинавского щита (3.0–1.75 млрд. лет) и позиция сфена (подробное описание смотри в тексте)

1–4 — континентальная кора Карельской провинции, возраст, млрд. лет: 1 — 2.7–3.4 (3.7), 2 — 2.7–3.1, 3 — 2.7–3.0, 4 — 2.7–2.8; 5 — континентальная кора Беломорской провинции, возраст 2.7–2.88 млрд. лет; 6 — континентальная кора Кольской и Мурманской провинций, возраст 1.9–3.1 млрд. лет; 7 — палеопротерозойские рифтогенные структуры; 8 — ювенильная континентальная кора палеопротерозойского возраста; 9 — океаническая кора архейского и 10 — палеопротерозойского возрастов; 11 — субконтинентальная кора; 12 — сфены с открытой изотопной U-Pb системой; 13–16 — сфены с закрытой изотопной системой, возраст, млрд. лет: 13 — древнее 2.8, 14 — 2.60–2.75, 15 — 1.80–1.94, 16 — 1.74–1.80; 17 — плюм; 18 — наиболее вероятное движение плит; 19 — разломы; 20 — обозначения террейнов: Вд — Водлозерский, ИВ — Иломантси-Вокнаволок, Ии — Иисалми, Ки — Киянта, По — Помякяйра, Ра — Рагун, ЦК — Центральнo-Карельский; провинции: Ко — Кольская, Му — Мурманская, БП — Беломорская.

Около 3.1 млрд. лет были сформированы «сиалические ядра» – наиболее древние структуры Фенноскандинавского щита (террейны Водлозерский, Рануа, Иисалми и Помокайра). Более поздние процессы в их пределах проявлены локально. При этом сфены Водлозерского террейна имеют наиболее древний возраст – древнее 2.8 млрд. лет. В ряде работ Водлозерский террейн интерпретируется как палеократон (Кожевников и др., 2006). Таким образом, приведенные данные не противоречат выбранной модели.

В периоды 2.82–2.95 и 2.72–2.78 млрд. лет главенствующая роль принадлежала субдукционно-аккреционным процессам, ответственным за формирование континентальной коры террейнов Кианта, Иломантси-Вокнаволоцкого, Центрально-Карельского, Тунтса, а также Беломорской структуры. К 2.70 млрд. лет происходило сгущивание всех вышеперечисленных образований, которое сопровождалось интенсивным гранитным магматизмом. Возраст сфена в пределах западной части Карельского кратона, вероятно, отражает время именно этого процесса.

Сфены террейнов Карельского кратона (Центрально-Карельского, Иломантси-Вокнаволоцкого, Тунтса и Кианта) имеют близкий возраст (2.6–2.7 млрд. лет). По всей вероятности, это связано с тем, что континентальная кора террейнов окончательно сформировалась в ходе единого аккреционного процесса. Аргументом в пользу этого предположения является то, что возраст сфенов в пределах террейнов близок к завершающим стадиям формирования коры кратона (например, к возрасту цирконов в гранитных интрузиях – индикаторах зрелой континентальной коры). Следовательно, можно предположить, что в пределах Карельского кратона возраст сфена отражает время стабилизации (кратонизации) западного и восточного фрагментов его земной коры (2.6–2.7 и 2.8 млрд. лет).

Континентальная земная кора Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса сформировалась к концу архея, причем в архее они составляли единую геодинамическую систему, на последних стадиях ее развития в Беломорье были проявлены коллизионные процессы, а в будущем кратоне – аккреционные.

Около 2.6 млрд. лет назад Карельский кратон прошел стадию кратонизации, то есть начал формироваться протоплатформенный осадочный чехол, отмечалось внедрение даек базитов.

В палеопротерозе земная кора региона находилась под влиянием мантийных плюмов, в результате происходило заложение рифтогенных структур (2.4–2.5 млрд. лет), приуроченных к границам крупных архейских блоков. Предполагается, что одна из таких структур (на границе

между Беломорской и Кольской провинциями) развилась в бассейн с океанической корой с ее последующей субдукцией. В период 2.1–2.3 млрд. лет (ятулий) образовывались крупные магматические провинции. Около 1.86–2.0 млрд. лет Беломорская структура входила в состав Лапландско-Кольского орогена. В ходе коллизионной стадии здесь формировались новые генерации покровно-надвиговых структур, что, вероятно, и привело к эксгумации архейских и палеопротерозойских пород со среднекоровых глубин. Предполагается, что возраст сфена фиксирует время вывода тектонических пластин из области высоких температур ($T > T_{\text{закр. сфена}}$) в область с температурой ниже температуры закрытия изотопной системы сфена ($T < T_{\text{закр. сфена}}$). Более молодые возрасты сфенов (1.74–1.79 млрд. лет) вблизи границы между Карельским кратоном и Беломорским подвижным поясом могут быть обусловлены более поздней флюидной переработкой.

Изложенный материал позволяет сформулировать *третье защитное положение*:

В Карельском кратоне возраст сфена преимущественно фиксирует стадии кратонизации земной коры (2.6–2.7 и 2.8 млрд. лет), а в пределах Беломорского подвижного пояса отражает время вывода тектонических пластин со среднекоровых глубин в приповерхностную область в ходе коллизионной стадии развития Лапландско-Кольского орогена.

Заключение

U-Pb изотопное исследование сфенов из пород Беломорского подвижного пояса и различных террейнов Карельского кратона Фенно-скандинавского щита показало, что существует связь его изотопного возраста с историей развития региона. Сфены Беломорского подвижного пояса имеют преимущественно палеопротерозойский возраст и, как правило, это не зависит от состава, генезиса и времени формирования вещества пород. При этом наблюдается омоложение возрастов сфенов с востока на запад. Вероятно, на возраст сфена в пределах Беломорья оказало влияние развитие Лапландско-Кольского орогена, краевой частью которого оно являлось.

Сфены Карельского кратона имеют архейский возраст, причем в его пределах также наблюдаются определенные закономерности распределения их возрастов. Четко выделяется Водлозерский террейн (палеократон), который, вероятно, кратонизировался раньше других. В его пределах отмечается сфен более древнего возраста, по сравнению с террейнами Центрально-Карельским, Иломанси-Вокнаволо-

ским, Тунтса и Кианта. В Карельском кратоне возраст сфена преимущественно фиксирует стадии кратонизации западного и восточного фрагментов его земной коры (2.6–2.7 и 2.8 млрд. лет).

Полученные данные позволяют говорить о возможности применения изотопного возраста сфена для оценки границ как между крупными структурами (Карельский кратон и Беломорский подвижный пояс), так и внутри них (Карельский кратон). U-Pb возраст сфена, особенно в сочетании с данными об изотопном возрасте других минералов-геохронометров, может служить важным дополнительным критерием при тектоническом районировании, с которым тесно связано выделение металлогенических провинций, и тестирование геодинамических моделей. Вероятно, в перспективе он будет полезен для поиска наиболее активных зон, к которым часто приурочены месторождения метасоматического генезиса.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Кушкова (Нестерова) Н. С. Коржинская зона меланжа в Керетском зеленокаменном поясе: геология, метаморфизм, U-Pb-возраст сфена // Научно-исследовательская работа студентов. Материалы 58-й научной студенческой конференции. Петрозаводск: ПетрГУ, 2006. С. 199–200.

Сибелев О. С., Кушкова (Нестерова) Н. С., Анисимов П. Н. Тектоно-метаморфиты зон меланжа Беломорского подвижного пояса (на примере структуры р-на оз. Коржино) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 23–36.

Футзан М. М., Кириозова Т. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В., Кушкова (Нестерова) Н. С. Граница Беломорский подвижный пояс – Карельский кратон: данные U-Pb изотопного исследования сфенов южного Беломорья // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Материалы конференции. М.: GEOS, 2006. С. 371–373.

Нестерова Н. С. Сфены Беломорской и Карельской провинций Фенноскандинавского щита: вариации состава и изотопный возраст // Геология и геоэкология исследования молодых. Материалы XIX российской конференции молодых ученых, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР проф. К. О. Кратца. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 47–50.

Нестерова Н. С. Сфены Беломорской и Карельской провинций Фенноскандинавского щита: состав и изотопный возраст (предварительные результаты) // Металлогения древних и современных океанов – 2008. Рудоносные комплексы и рудные фации. Материалы XIV студенческой школы. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 292–295.

Нестерова Н. С. Районирование восточной части Фенноскандинавского щита с использованием изотопного U-Pb возраста сфена // Геология, полезные ископаемые и геоэкология Северо-Запада России. Материалы XX российской конференции молодых ученых, посвященной памяти К. О. Кратца. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 103–105.

Нестерова Н. С., Фугзан М. М., Кирнозова Т. И. Изотопный U-Pb возраст и состав сфенов Беломорской и Карельской провинций Фенноскандинавского щита // I Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная памяти академика А. П. Карпинского. Тезисы докладов. СПб: ВСЕГЕИ, 2009. С. 512–515.

Нестерова Н. С., Фугзан М. М., Кирнозова Т. И. U-Pb возраст сфенов Фенноскандинавского щита: новые данные // Изотопные системы и время геологических процессов. Материалы IV российской конференции по изотопной геохронологии. Т. 2. СПб: ИП Каталкина, 2009. С. 49–52.

Nesterova N. S., Kimozova T. I., Fugzan M. M. U-Pb age of sphenes (titanes) from neoarchaeon sanukitoids of the Karelian craton // Geochemistry of magmatic rocks – 2010. Abstracts of XXVII International conference School «Geochemistry of Alkaline rocks». Moscow-Koktebel', 2010. P. 129–130.

Нестерова Н. С., Фугзан М. М., Кирнозова Т. И. U-Pb возраст сфена Центрально-Карельского и Водлозерского террейнов Карельского кратона // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXI молодежной научной конференции, посвященной памяти К. О. Кратца. СПб, 2010. С. 59–62.

Нестерова Н. С. Тестирование геодинамических моделей раннего докембрия восточной части Фенноскандинавского щита с использованием U-Pb геохронологии сфена // Современное состояние наук о Земле. Материалы международной конференции, посвященной памяти В. Е. Хаина. М.: Геологический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 2011. С. 2232–2235.

Нестерова Н. С. Геодинамическая интерпретация U-Pb возрастов сфенов Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита // Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского. Изотопно-геохимические и геохронологические методы. СПб, 2011. С. 42–46.

Слабунов А. И., Хёлтта П., Шаров Н. В., Нестерова Н. С. 4-D модель формирования земной коры Фенноскандинавского щита в архее как синтез современных геологических данных // Геология Карелии от архея до наших дней. Материалы докладов Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 13–21.

Нестерова Н. С. Геологическая интерпретация U-Pb возрастов титанитов (сфенов) восточной части Фенноскандинавского щита // Вестник Института геологии Коми НЦ РАН. 2011. № 6. С. 6–11.

Нестерова Н. С., Кирнозова Т. И, Фугзан М. М.. U-Pb возрасты сфенов из пород Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита (новые данные) // Геохимия. 2011. № 12. С. 1–8. (в печати)

Нестерова Н. С. Районирование восточной части Фенноскандинавского щита с использованием U-Pb возрастов сфенов (титанитов) // Региональная геология и металлогения. 2011. № 48. (в печати)

Сдано в печать 20.10.11. Формат 60x84¹/₁₆.
Гарнитура «Times». Уч.-изд. л. 1,1. Усл.-печ. л. 1,2.
Тираж 100. Изд. № 241 Заказ 996

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50